

歪み硬化型セメント系複合材料の疲労実験と解析手法の構築

○東京大学 学生員 浅本 晋吾
東京大学 正 員 松本 高志

1. はじめに

近年開発された歪み硬化型セメント系複合材料 (Engineered Cementitious Composite, ECC) は、ポリエチレン等の合成短繊維で補強されたセメント系複合材料であり、引張応力下においてアルミ合金並みの延性、優れた靱性、高いエネルギー吸収能を持つため様々な用途への適用が現在提案されている。その適用例のひとつに、増加した車両交通量と過積載車の繰り返し輪荷重をもたらす疲労劣化によって深刻な損傷が報告されている既設道路橋 RC 床版の増厚補修・補強が考えられている。ECC の優れたエネルギー吸収能は道路橋 RC 床版の疲労寿命を向上させることができると考えられ、ECC による補修・補強の早期導入を実現させるため ECC 材料自体の疲労寿命についての把握が必要とされている。しかし、ECC の疲労寿命に関する理論に基づいた予測/解析手法は提案されていないのが現状である。

そこで、本研究では ECC の曲げ疲労載荷実験を行い、ECC の曲げ疲労載荷時の材料挙動・疲労寿命を実験的に把握し、疲労載荷時の ECC の材料挙動・疲労寿命を予測できる疲労解析モデルを有限要素法上に構築し、実験結果と比較することによりその妥当性を検証した。

2. ECC の疲労解析モデル

ECC は引張応力下において複数ひび割れを形成し応力が漸増する硬化挙動を示した後に、ひび割れの局所化と繊維の抜け出しによって応力が減少する軟化挙動を示す。本解析モデルでは疲労による繊維架橋応力の減少が ECC の疲労劣化のメカニズムであると考え、硬化挙動と軟化挙動のそれぞれにおいてこれを考慮した。以下に詳細を説明する。

まず、硬化挙動時の疲労解析モデルについて説明する。ECC は引張応力下でひび割れが局所化する以前の硬化挙動においては、分布した複数のひび割れが発生する。この複数ひび割れ状態においてひび割れの密度は高く、個々のひび割れ開口量は小さい。そこで、複数ひび割れ状態にある材料は、ひび割れの開口量と密度に反映した付加的なひずみ (クラックひずみ) を有する連続体としてモデル化し、その構成式は弾塑性理論を適用して導いた。降伏関数とひずみ硬化則は、ひび割れが最大引張応力に直交する方向に発生すること、複数ひび割れにより生ずるひずみが異方的であることを表せるように定めた。このように連続体としてモデル化した硬化挙動時の応力を図 1 に示すように載荷回数の増加とともに劣化させた。各有限要素において、硬化挙動に達した要素は疲労するものとし、弾性挙動時にある要素は疲労しないとした。疲労の劣化量については、繊維架橋応力の疲労劣化を考慮した関数として、 $\sigma_N/\sigma_1 = f(\varepsilon, N)$ (疲労劣化関数) を解析モデルの構成式に含めることで表現した。

次に、軟化挙動時の疲労解析モデルについて説明する。軟化挙動では、一本の局所ひび割れの疲労劣化に材料挙動が支配されるものとして、この局所ひび割れ以外の要素については軟化挙動時において除荷させた。局所ひび割れの劣化挙動に関しては、Suthiwarapirak¹⁾の研究を参考に不連続面を表す厚さ 0 の要素、インターフェイス要素を梁中心部に用いてモデル化した。劣化については図 2 に示すように、硬化挙動と同様に載荷回数の増加とともに軟化挙動を劣化させ、応力劣化量は硬化挙動の劣化に適合させた。

また、疲労劣化関数 $f(\varepsilon, N)$ については Zhang²⁾ のコンクリートの疲労劣化関数

$$\sigma_N/\sigma_1 = 1 - k * \log(N) \quad (k \text{ はひび割れ開口量を含めた変数}) \dots\dots\dots (1)$$

を参考にした。本研究における疲労劣化関数は、 k はひずみを考慮した変数とし、

$$f(\varepsilon, N) = 1 - (k_0 + \gamma \cdot \varepsilon) * \log(N) \quad (k_0, \gamma \text{ は定数}) \dots\dots\dots (2)$$

と表した。各定数 k_0 , γ については各載荷回数における供試体中心部の変位の実験結果から較正した。関数 $f(\varepsilon, N)$ は硬化挙動時の始点と終点の応力 σ_{fc} , σ_{mb} のそれぞれに適用した。つまり、載荷回数が N 回の要素の σ_{fc} , σ_{mb} を $\sigma_{fc}^N = f(\varepsilon_{fc}, N) * \sigma_{fc}$, $\sigma_{mb}^N = f(\varepsilon_{mb}, N) * \sigma_{mb}$ として劣化させそれを結び、図に示すように応力が疲労劣化した硬化挙動の応力-ひずみ曲線は直線になると仮定した。

キーワード: ECC, 補修・補強, 繊維補強, 疲労寿命, 疲労劣化関数

〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 TEL: 03-5841-7455 FAX: 03-5841-7496

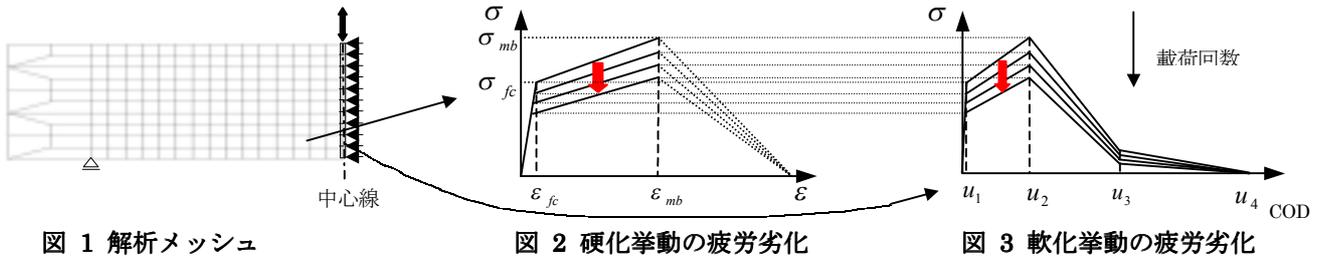


図 1 解析メッシュ

図 2 硬化挙動の疲労劣化

図 3 軟化挙動の疲労劣化

3. ECC の変位と 載荷回数 の関係と 疲労寿命 の実験結果と 解析結果

本実験条件について表 1 にまとめる。計測は、 載荷回数 50 回毎に 上限荷重 S_{max} と 下限荷重 S_{min} における 供試体中心部の変位と破壊に至るまでの 載荷回数を計測した。 載荷回数は最大 200 万回までとした。

変位と 載荷回数 の関係の 解析結果を 図 4 に示す。 解析結果は $f(\epsilon, N) = 1 - (0.06 - 0.55 \cdot \epsilon) \cdot \log N$ の時に 実験結果を良好に再現する。 また、 この 解析結果は 複数ひび割れ状態から 局所化ひび割れ状態に 遷移する (図中 \times 点) 本材料の 特徴的な 挙動と 疲労寿命 に いたる 最終破壊時の 挙動を 捉えている。 以上より 疲労 載荷下 における 梁中心部の変位 において 実験結果に 即した 挙動が 得られた ことから、 本 解析モデルの 妥当性が 示されているもの と 考えられる。

疲労寿命に関する P_N/P_{max} と 載荷回数 N の 解析結果 (S-N 曲線) を 図 5 に示す。 上記の 疲労劣化関数を用いて 得られた S-N 曲線は 本実験 に対して 概ね 妥当な 結果を 示しているが、 疲労実験の ばらつきを 考慮すると 本 解析モデルの 妥当性の 検証 については より 多くの 実験が 必要である。

疲労劣化関数 $f(\epsilon, N)$ の 定数 の 変化による 解析結果 (S-N 曲線) の 違いを 図 6 に示す。 ここでは、 定数 k_0 を 変化させた ときの P_N/P_{max} と N の 解析結果 (S-N 曲線) の 違いについて 示す。 結果は、 定数 k_0 の 変化によって 硬化 挙動時の 応力劣化は 大きく 変化し、 破壊に至るまでの 載荷回数に 大きく 影響した。 k_0 の 変化させた 解析モデル 1、 2 では 実験結果と 大きく 異なるため、 提案した 解析モデルの方が 有効である と 思われる。 今後は、 数多くの 実験結果を もとに 定数 k_0 、 γ の 較正を 再度 行い、 より 正確な 疲労寿命を 予測する 解析モデルを 構築する 必要がある。

表 1 実験条件

実験方法	供試体寸法	疲労載荷方法	S_{min}/S_{max}	疲労載荷速度
三点曲げ疲労載荷	5cm×5cm×20cm	片振り載荷	0.2	8Hz

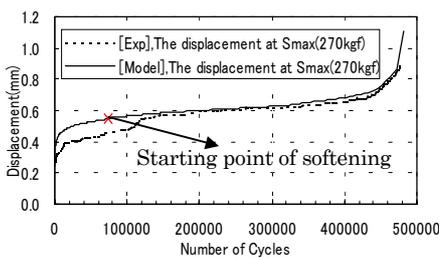


図 4 変位と 載荷回数 の関係

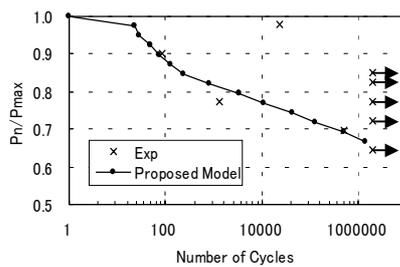


図 5 S-N 曲線

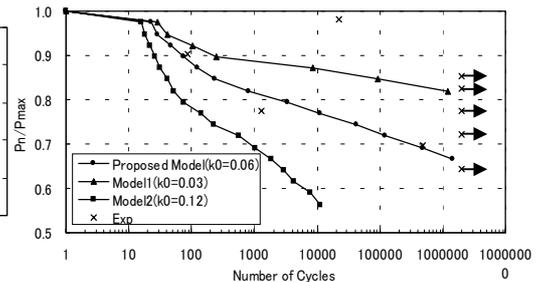


図 6 定数 k_0 を 変化させた S-N 曲線

4. まとめ

本研究では、 解析によって ECC の 疲労 載荷時の 材料挙動・ 疲労寿命 について 予測を 行い、 硬化 挙動時の 高い 疲労強度 についての 確認が できた。 今後の 課題として は、 本 解析モデル を 用いて 損傷した RC 床版の ECC による 補強・ 補修を 想定した 解析モデルを 構築し、 ECC の 適用可能性 について 検証を 行うことが 挙げられる。

最後に、 ECC 供試体・ 材料データ を 提供して 下さった 鹿島技術研究所の 関田徹志 主任研究員に 謝意を 表します。

参考文献

- 1)Peerapong Suthiwarapirak. Fatigue Life Analysis of Fiber Reinforced Concrete Bridge Decks, 東京大学修士論文, 2000
- 2)J.Zhang. Fatigue Fracture of Fiber Reinforced Concrete-An Experimental and Theoretical Study. PhD thesis, Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark